

곡류 및 버섯류의 평형함수율 및 박층건조방정식에 관한 연구(I)*
-벼의 薄層乾燥方程式-

Equilibrium Moisture Contents and Thin Layer Drying
Equations of Cereal Grains and Mushrooms (I)
-Thin Layer Drying Equations of Short Grain Rough Rice-

금 동 혁** 박 춘 우***
정회원 정회원
D. H. Keum C. W. Park

ABSTRACT

Thin layer drying tests of short grain rough rice were conducted in an experimental dryer equipped with air conditioning unit. The drying tests were performed in triplicate at three air temperatures of 35°C, 45°C, 55°C and three relative humidities of 40%, 55%, 70%, respectively. Previously published thin layer equations were reviewed and four different models widely used as thin layer drying equations for cereal grains were selected. The selected four models were Page's, simplified diffusion, Lewis's and Thompson's models. Experimental data were fitted to these equations using stepwise multiple regression analysis. The experimental constants involved in four equations were represented as a function of temperature and relative humidity of drying air. The results of comparing coefficients of determination and root mean square errors of moisture ratio for four equations showed that Page's and Thompson's models were found to fit adequately to all drying test data with coefficient of determination of 0.99 or better and root mean square error of moisture ratio of 0.025.

주요용어 (Key Words): 박층건조방정식 (Thin Layer Drying Equation), 단립중벼 (Short Grain Rough Rice)

1. 緒 論

벼, 보리 등의 곡류와 표고 등의 버섯류는 건조 방법에 따라서 품질이 크게 좌우되므로 건조과정을

해석하고 적정 건조조건을 구명하는 것이 무엇보다도 중요하다. 농산물의 건조과정을 해석하고 건조조건을 구명하는 데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다.

* 본 연구는 한국과학재단 '92년도 연구비 지원에 의하여 수행된 과제임

** 성균관대학교 생물기전공학과 교수

*** 성균관대학교 생물기전공학과 대학원

박충건조속도는 송풍공기의 풍속, 온도 및 상대습도의 영향을 받는다. 풍속은 일정 풍속이상에서는 영향을 무시할 수 있으나, 온도가 높을수록, 상대습도는 낮을수록 건조속도는 증가한다. 이러한 건조속도의 영향인자를 복합적으로 표시한 박충건조방정식의 개발이 필요하다.

국내 생산 벼의 박충건조방정식에 대한 연구는 일부 보고된 바 있으나, 실험장치의 미비로 상대습도의 영향을 고려하지 못한 것들이어서, 대부분 외국의 벼를 대상으로 외국에서 개발된 건조방정식을 이용하고 있는 실정이다. 따라서, 국내 생산 벼에 적합한 건조기를 개발하고 적절한 건조조건을 구명하기 위해서는 우리 나라 벼 품종에 대하여 송풍공기의 온도와 상대습도의 영향을 고려한 박충건조방정식의 개발이 필요한 실정이다.

이러한 견지에서 본 연구의 목적은 우리 나라에서 재배된 벼를 대상으로 송풍온도와 상대습도의 영향을 고려한 박충건조실험을 수행하여 적합한 박충건조방정식을 개발하는 데 있다.

2. 문헌 개요

가. 곡물 박충건조방정식

박충건조방정식은 후충건조해석 및 건조기의 설계를 위한 건조 시뮬레이션 모델의 기본 자료로 사용된다. 박충건조방정식은 대부분 몇가지 형태의 건조방정식을 선택하고 통계적인 방법을 이용하여 이들 방정식 중에서 실험치와 가장 적합한 식을 해당 곡물의 박충건조방정식으로 결정한다. 박충건조방정식은 크게 다음의 3범주로 나눌 수 있다.

(1) 수분확산 방정식

Newman(1931)이 Fick의 확산법칙을 고체의 감률 건조기간의 박충건조속도를 해석하는데 이용한 이래로 많은 연구자들이 이를 곡물건조에 이용하고 있다. Fick의 확산법칙을 이용한 수분확산 방정식은 다음 (1)식으로 표시된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, M : 곡립내부 함수율(d.b.)

t : 시간(hr)

D : 수분확산계수(m²/hr)

c : 형상계수 (구 2, 실린더 1, 평판 0)

상기의 방정식의 해석해는 Barrer(1941), Bird 등 (1969), Carslaw와 Jaeger(1959), Crank(1974) 등이 제시한 바 있다.

구의 경우 수분확산 방정식의 해는 다음과 같이 무한급수로 표시된다.

$$MR = \frac{6}{\pi} \sum_1^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 D}{R^2} t\right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}$: 함수비

M : 곡립의 평균함수율

M_o : 초기 함수율

M_e : 평형함수율

R : 구의 반경(m)

식 (2)는 Babbitt(1949), Becker와 Sallans(1955), Chittenden과 Hustrulid(1966), Pabis와 Henderson (1961), Wang(1978) 등이 곡물의 박충건조방정식으로 사용한 바 있다.

(2) 축소 수분확산방정식

수분확산방정식의 해석해는 무한급수이다. 건조시간이 길어지거나 함수비가 0.6이하가 되면, 건조속도는 무한급수의 처음 몇 개의 항으로 표시될 수 있다. Simmonds 등(1953), Hustruid와 Flikke(1959), Allen(1960), Henderson과 Pabis(1961), Boyce(1965), Wang(1978) 등이 무한급수의 첫항을 건조방정식으로 사용한 바 있다. 무한급수의 첫항만으로 표시된 건조방정식은 다음 식 (3)과 같다.

$$MR = A \exp(-K_1 t) \dots\dots\dots (3)$$

여기서, A, K₁ : 실험상수

수분확산방정식의 무한급수로 표시된 해석해의 처음 2개의 항을 취하여 건조방정식으로 사용한 예도 있다. Henderson(1974)은 옥수수의 건조방정식으로 이를 사용하였으며, Stipe 등(1973)은 현미의 건조방정식으로 사용한 바 있다.

(3) 반이론식 및 특수 회귀식

농산물의 수분 증발속도는 현재의 함수율과 열풍의 평형함수율의 차이에 비례한다고 가정하면 다음 (4)식이 도출된다.

$$MR = \exp(-K_2 t) \dots\dots\dots (4)$$

여기서, K₂ : 실험상수

Page(1949)는 식 (4)를 수정하여 다음 식 (5)를 제시하였다.

$$MR = \exp(-P t^Q) \dots\dots\dots (5)$$

여기서, P, Q : 실험상수

식 (5)는 Page(1949)가 옥수수의 박충건조방정식으로 처음 사용한 이래로 Van Rest와 Isaacs(1966), Flood 등(1969), Agrawal과 Singh(1977), Wang(1978) 등 많은 연구자들이 곡물의 박충건조방정식으로 사용하였다.

Thompson(1968)은 식 (4)를 시간에 관하여 풀면 ln(MR)의 1차식으로 표시되는 사실에 착안하여, 다음의 2차식을 옥수수의 건조방정식으로 사용하였다.

$$MR = C \ln(MR) + D (\ln MR)^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서, C, D : 실험상수

나. 벼의 박충건조방정식

옥수수, 밀 등의 곡물의 박충건조방정식은 많이 연구되었으나 벼에 대한 것은 그렇지 못한 실정이며, 특히 단립종 벼에 대한 연구는 더욱 이루어지지 못하고 있다.

中馬豊 등(1969)은 단립종벼의 건조속도를 수분확산방정식의 제 1항만을 취한 식 (3)의 형태의 방정식을 발표하고, 실험상수 A₁ = 0.87, K₁은 다음 식 (7)과 같이 제시하였다.

$$K_1 = 5.167 \exp(-3,290/T) \dots\dots\dots (7)$$

여기서, K₁의 단위는 (1/s)이며, 온도 T는 절대온도(K)이다.

Agrawal과 Singh(1977)은 단립종벼의 박충건조방정식을 식 (5)의 Page형으로 나타내고 실험상수를 다음 식 (8)과 같이 열풍의 온도와 상대습도의 함수로 나타내었다.

$$P = 0.02958 - 0.44565RH + 0.01215T$$

$$Q = 0.13365 + 1.93653RH - 1.77431RH^2 + 0.009468T \dots\dots\dots (8)$$

여기서, RH : 상대습도(dec.)

T : 온도(℃)

Wang과 Singh(1979)은 중립종벼의 박충건조 방정식으로 수분확산방정식 {식 (2)}, 축소 수분확산방정식 {식(3)}, Page식 {식(5)} 및 2차함수형 등 4개 형식을 분석한 결과, 수분 확산모델은 오차가 크게 나타나 적합치 못하며, 식 (3), 식 (5) 및 2차함수형이 모두 비슷한 낮은 수준의 오차를 나타내어 박충건조방정식으로 적절한 것으로 보고하였다. 이 보고에서 Page형 방정식의 실험상수를 다음 식 (9)와 같이 제시하였다.

$$P = 0.01579 + 0.0001746T - 0.01413RH$$

$$Q = 0.6545 + 0.002425T + 0.07867RH \dots\dots\dots (9)$$

西山喜雄(1979)은 단립종벼의 박층건조방정식을 다음 (10)식으로 제시하였다.

$$MR = \phi(Kt) \dots \dots \dots (10)$$

여기서, $\phi(X) = 1 - 1.077527\sqrt{X} + 0.30396355 X$
 $(0 \leq X \leq 0.9)$

$\phi(X) = 0.6079461 \exp(-X) + 0.1562563$
 $\exp(-4.02687 X) (X > 0.9)$

$$K = 2.50 \times 10^5 \exp\left(-\frac{4454}{T}\right)$$

t : 건조시간(hr)

T : 온도(K)

3. 실험재료 및 방법

가. 공시재료

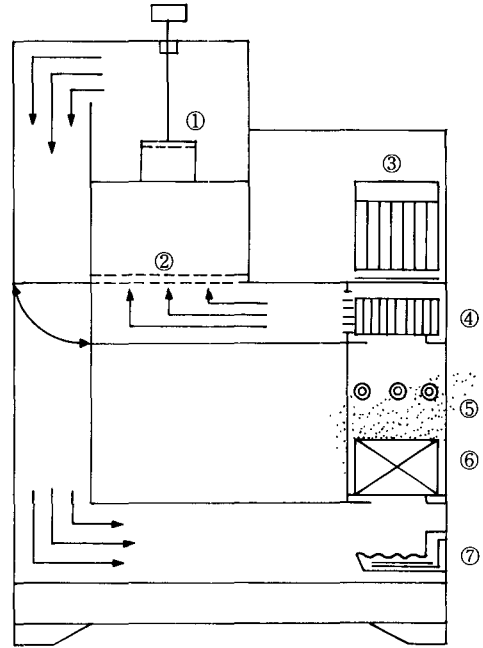
본 실험에 사용된 벼는 '95년산 단립종 추청벼이며, 실험기간동안 함수율 변화를 최소화하기 위하여 비닐봉지에 넣어 밀봉하고 저온저장고에 보관하였다. 실험을 시작하기 1일 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내어 상온에 노출시켜 곡온이 상온과 평형되게 한 후 약 100 g의 시료를 건조실험에 사용하였다.

나. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 그림 1과 같이 온도와 상대습도를 제어할 수 있는 공기조화장치, 건조실 및 시료의 무게 자동계측·기록 장치로 구성되어 있다.

공기조화장치는 가열장치, 가습장치, 냉동기 및 송풍장치로 구성되어 있으며, 건구온도 20~70℃, 상대습도 30~98% 범위의 공기를 발생할 수 있도록 설계, 제작하였다. 공기 조화상태의 오차는 온도 ± 0.3℃, 상대습도 ± 3% 정도였다. 공기가 정상상태에 도달한 후에 건조실을 통과할 수 있도록 건조실 하부의 다공판과 공기층만실 좌측에 공기 순환 밸브

를 설치하였다.



① Sample tray ② Perforated plate ③ Motor ④ Fan
 ⑤ Heater ⑥ Cooling coil ⑦ Humidifier

Fig. 1 Schematic diagram of experimental dryer.

건조실의 하부에는 다공판을 설치하여 공기의 유속분포가 균일하게 되도록 하였다. 건조실에 시료상자를 설치하였으며, 시료의 무게 변화는 시료상자에 연결된 로드셀과 자료수집장치에 의하여 연속적으로 측정하였다. 그림 2와 같이 시료상자는 원통형(직경 17cm)으로 제작하고, 시료층을 통과하는 공기가 시료층 외의 다른 통로로 유출되는 것을 방지하기 위하여 시료상자를 비 휘발성 액체가 들어 있는 원통에 잠기게 하였다.

다. 실험방법

본 실험은 건조온도 35℃, 45℃ 및 55℃의 3수준,

상대습도 40%, 55% 및 70%의 3 수준에서 각각 3 반복 수행되었다. 풍속은 시료상자 하부에서 측정하였으며, 0.7 m/sec로 일정하게 유지하였다.

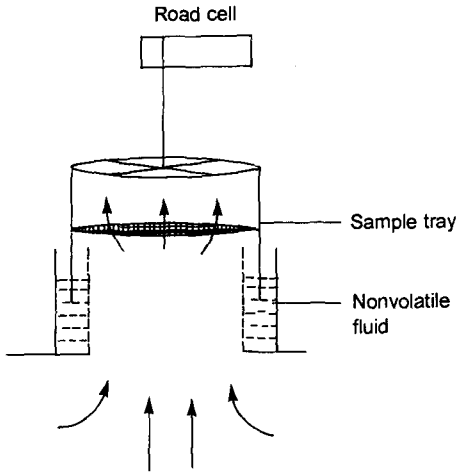


Fig. 2 Cross-section of sample tray

실험 시작 1일 전에 시료를 저온 저장고에서 꺼내 시료 온도가 실내 온도와 평형을 유지하게 한 후 100 g을 취하여 시료상자에 담아 실험장치의 건조실에 설치하였다. 실험장치를 가동하여 공기의 상태가 설정한 온도와 상대습도의 정상상태에 도달한 후 공기가 시료상자를 통과하도록 하였다.

송풍 기류에 의한 시료상자의 미세한 흔들림에 따른 계측치의 변화를 없애기 위해, 건조 기간동안 30분 간격으로 29분 동안은 건조, 1분 동안은 휴지하였으며, 시료의 무게 변화는 송풍기 휴지기간 동안에 측정하였다. 자료수집 프로그램은 C-언어로 작성하였다.

함수율은 10 g입자 - 135°C - 24시간법의 상압정온측정법으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 건조속도

그림 3 ~ 그림 5는 열풍의 상대습도가 각각 40%, 55% 및 70%일 때 열풍온도에 따른 함수비의 변화를 비교한 것이다. 함수비가 0.5에 이르는 반건조시간을 비교해 보면, 상대습도가 40%일 때 열풍온도 35°C, 45°C, 55°C의 경우에 각각 2.1시간, 1.6시간 및

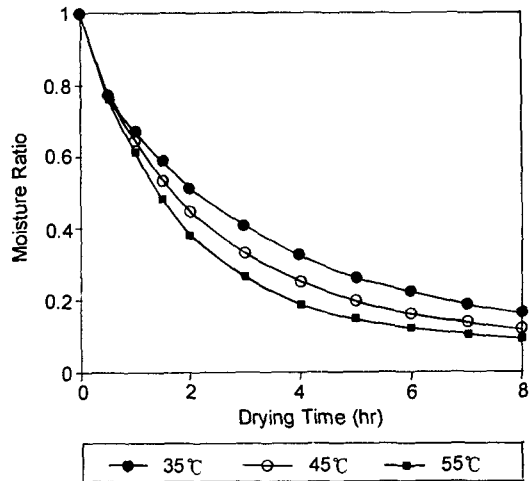


Fig. 3 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 40%.

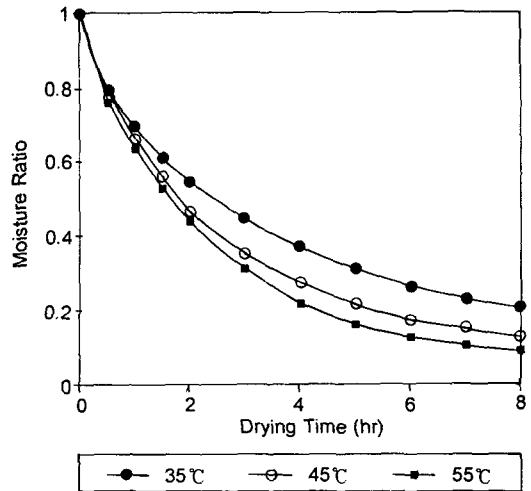


Fig. 4 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 55%.

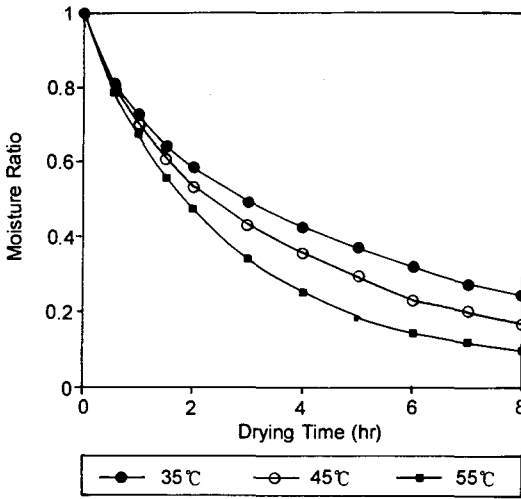


Fig. 5 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 70%.

1.4시간으로 나타났으며, 상대습도가 55%일 때는 각각 2.4시간, 1.8시간 및 1.6시간, 상대습도가 70%일 때는 2.9시간, 2.2시간 및 1.8시간으로 나타났다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 열풍 온도와 상대습도에 크게 영향을 받으며, 상대습도가 높을수록 열풍온도의 영향은 크게 나타났으며, 열풍 온도가 낮을수록 상대습도의 영향은 크게 나타났다.

나. 박층건조방정식

곡물의 박층건조방정식으로 널리 사용되고 있는 식 (3)~식 (6)의 4가지 모델을 선택하여 이들 방정식에 포함된 실험상수를 stepwise 다중회귀분석 프로그램을 이용하여 결정하였다.

건조시간 t의 단위는 식 (5)의 Page모델에서는 분 (min.)으로 하고 나머지 모델에서는 시간(hr)으로 하였다. Page 모델에서 t=1이면 Q의 값에 관계없이 I⁰ = 1이 된다. 보통 Q는 열풍의 온도와 상대습도의 함수로 나타나며, t=1일 경우 Q의 값이 I⁰의 값에 영향을 주지 못하므로 열풍의 온도나 상대습도의 영향이 나타나지 않는다. t의 단위를 hr로 나타내면 이러한 문제가 많은 경우에 건조기간의 중반에 나타나지만,

t의 단위를 분으로 하면 이러한 문제가 건조초기에 나타나므로 실제 건조과정을 해석하는 데 거의 영향을 주지 못한다. 이러한 이유로 Page 모델에서는 건조시간 t의 단위를 분으로 하였다.

평형함수율은 다음 식 (11)을 사용하였다(Chung-Pfost, 1992).

$$M_e = 0.29394 - 0.046015 \ln [-(T + 35.703) \ln (RH)] \dots\dots\dots (11)$$

여기서, M_e : 평형함수율(dec, d.b.)

T : 열풍온도(°C)

4가지 박층건조방정식의 실험상수는 모두 열풍의 온도와 상대습도의 함수로 나타났으며, 그 결과는 표 1과 같다.

이상의 4개 박층건조방정식의 적합성을 비교하기 위하여 함수비의 실험치와 4개의 방정식에 의한 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다.

표에서와 같이 Page 모델과 Thompson 모델이 함수비의 RMSE가 가장 작은 값을 나타내었으며, 또한 결정계수의 값도 0.992이상으로 가장 큰 값을 나타냄으로서 실험치와 가장 잘 적합하는 건조모델로 판단할 수 있다. 다음으로 Lewis모델, 축소 수분확산 모델의 순으로 적합도가 나타났다. Page 모델을 기준으로 함수비의 RMSE를 비교해 보면, Lewis 모델은 약 1.9배, 축소 수분확산모델은 약 2.0배의 큰 값을 나타내었다.

그림 6은 온도 55°C, 상대습도 55% 조건에서 실험치와 각 모델에 의한 예측 함수비를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측치는 건조기간 전 구간에 걸쳐서 실험치와 잘 일치함을 알 수 있으며, 축소 수분확산모델에 의한 예측 함수비는 건조초기인 건조시간 약 1시간까지는 실험치 보다 낮은 값을 나타내었으나, 1시간이 경과한 후부터는 실험치 보다 높은 값을 나타내었다. Lewis 모델에 의한 예측 함수비는 전 건조기간에 걸쳐서 실험치와 상당한 오차를 나타내었다. 이상과 같은 경향은 다른 건조조건에서도 비슷하게 나타났

Table 1 Result of regression analysis for four different models

<p>A. Page 모델</p> $MR = \exp(-P t^Q)$ $P = 1.69453E-2 + 2.69833E-4 T - 1.21333E-2 RH$ $Q = 6.99294E-1 + 1.01583E-3 T - 3.71889E-2 RH$
<p>B. 축소 수분확산모델</p> $MR = A \exp(-K_1 t)$ $A = 1.10960 - 5.83368E-3 T - 6.48602E-1 RH - 2.51507E-5 T^2 + 2.38455E-1 RH^2$ $+ 1.32583E-2 T RH$ $K_1 = 2.04293E-1 + 1.53228E-3 T - 2.85692E-1 RH - 5.49329E-7 T^2 - 1.38663E-1 RH^2$ $+ 6.94665E-3 T RH$
<p>C. Lewis 모델</p> $MR = \exp(-K_2 t)$ $K_2 = 1.22111E-1 + 5.49133E-3 T - 1.71811E-1 RH$
<p>D. Thompson 모델</p> $t = C \ln(MR) + D \ln(MR)^2$ $C = -7.73274 + 1.31360E-1 T + 1.12245E+1 RH - 2.64477E-4 T^2 - 7.51016 RH^2$ $- 1.37239E-1 T RH$ $D = 1.43172 - 1.44670E-1 T + 1.44240E+1 RH + 2.44195E-3 T^2$ $- 2.97633 RH^2 - 2.36758E-1 T RH$

다.

벼의 박충건조방정식에 대한 본 연구의 결과와 다른 연구자들의 결과를 비교하기 위하여, 본 연구에서 실험치와 가장 잘 일치하는 Page 모델과 벼에 대한 中馬豊의 식 (3) (7)식, Agrawal의 (5) (8)식, Wang의 (5) (9)식, 西山喜雄의 (10)식을 비교하였다. 그림 7은 온도 55℃, 상대습도 55% 조건에서 이들의 비교 결과를 나타낸 것이다.

Table 2 Comparison of coefficients of determination (r^2) and root mean square errors(RMSE) of moisture ratio for four different models

Models	r^2	RMSE
Page model	0.99278	0.02527
Simplified diffusion model	0.96239	0.05086
Lewis model	0.97786	0.04724
Thompson model	0.99763	0.02393

그림에서와 같이 Wang의 박층건조방정식은 본 연구의 Page 모델과 건조 초기에는 아주 잘 일치하였으나, 건조 후기에 조금 낮은 값을 나타내었다. 西山喜雄의 모델은 전반적으로 약간 낮은 값을 나타내었다. Agrawal의 모델은 건조 초기에는 약간 높은 값을 나타내었으나 후기에는 아주 낮은 값을 나타내었다. 中馬豊의 모델은 전반적으로 본 연구의 결과보다 아주 낮은 값을 나타내었다. 이상과 같은 현상은 다른 건조 조건에서도 비슷하게 나타났다. 이와 같은 결과는 실험에 사용된 시료의 차이에 주로 기인된 것이며, 특히 中馬豊의 모델의 경우 실험상수의 값이 절대온도만의 함수로 표현된데 기인하며, Agrawal의 모델은 건조실험을 2~4시간 수행한 결과를 분석한 자료이므로 건조 후반부의 예측치가 크게 다르게 나타난 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구의 Page 모델과 Wang 및 西山喜雄의 모델은 서로 동일한 경향을 나타내는 방정식으로 간주할 수 있으나, 西山喜雄의 모델은 건조시간에 대한 양함수로의 표현이 어려워 후층건조의 시뮬레이션 모델 등 실용면에서 이용이 곤란한 것으로 판단된다.

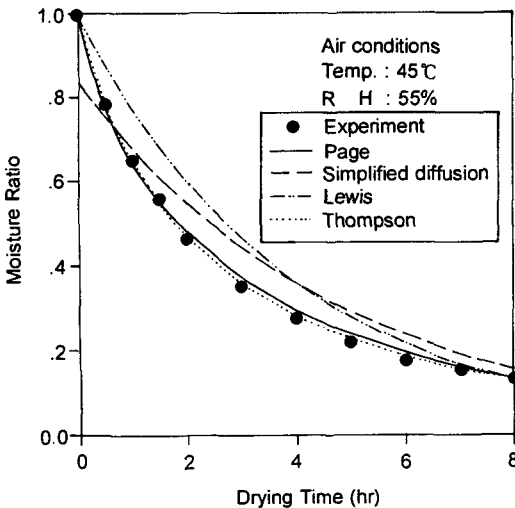


Fig. 6 Comparison of experimental and predicted values by four different models.

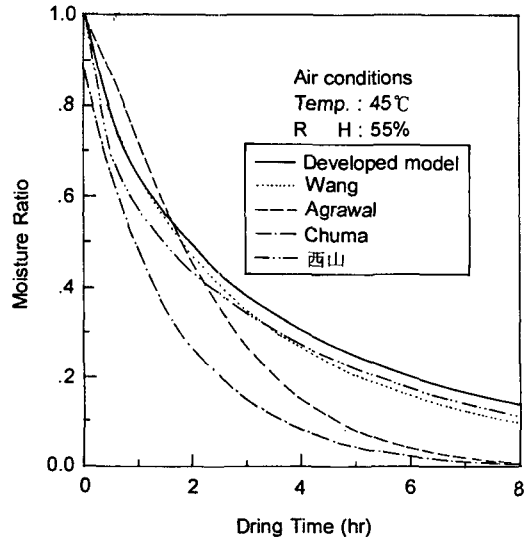


Fig. 7 Comparison of the model developed in this study to those and by other researchers.

5. 결론 및 요약

우리나라에서 재배된 단립종 벼의 박층건조 방정식을 개발하기 위하여 열풍의 온도와 상대습도를 조절할 수 있는 공기조화장치가 부착된 실험용 건조 장치를 제작하여 박층건조 실험을 수행하였다. 건조 실험에 사용한 공시 재료로는 우리나라에서 주로 재배되고 있는 단립종 벼인 추청을 사용하였다. 박층건조 실험은 열풍온도 35°C, 45°C, 55°C의 3수준, 상대습도 30%, 45%, 65%의 3수준으로 3반복 수행하였다.

박층 모델로는 곡물의 건조 모델로 널리 사용되고 있는 Page 모델, 축소 수분확산모델, Lewis 모델 및 Thompson 모델 등 4개의 모델을 선정하여 실험상수를 결정하고 적합성을 비교하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 건조 속도는 열풍의 온도와 상대습도의 영향을 받았으며, 온도의 영향이 더 크게 나타났다. 온도의 영향은 상대습도가 높을수록 더 크게 나타났으며, 상대습도의 영향은 열풍 온도가 낮을수록 더 크게

나타났다.

2. 버의 박층건조방정식으로 선정된 4개 모델에 포함된 실험상수는 열풍의 온도와 상대습도의 다중회귀식으로 나타났으며, 결과를 표 1에 제시하였다.
3. Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측 함수비는 건조기간 전 구간에 걸쳐서 실험치와 잘 적합하였으나, 축소 수분확산 모델과 Lewis 모델은 실험치와 상당히 큰 오차를 나타내었다.
4. 본 연구에서 개발한 Page 모델과 다른 연구자들의 모델을 비교한 결과, Wang 및 西山喜雄의 모델이 본 연구의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.
5. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 단립종 버의 박층건조방정식으로는 본 연구의 Page 모델과 Thompson 모델이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 고희균, 금동혁외 5인. 1990. 농산가공기계학. 향문사.
2. 금동혁. 1986. 버 건조과정 분석에 필요한 자료 및 관련식. 한국농업기계학회지 11(2):92~102.
3. 정춘식. 1986. 단립종 버의 흡습평형 함수율 및 흡습방정식. 성균관대학교 석사학위논문.
4. 中馬 豊. 1969. 堆積農産物の非正常熱傳達. 日本農業機械學會誌 31(1):45~51.
5. Agrawal, Y. C. and R. P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE Paper No. 77~3531.
6. Allen, J. R. 1960. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. J. Agric. Engr. Res. 5(4):363.
7. Babbit, J. D. 1949. Observations on the adsorption of water vapor by wheat. Canadian J. Research 27F, 55~72.
8. Barrer, R. M. 1941. Diffusion in and through solids. Cambridge University Press, London.
9. Becker, H. A. and H. R. Sallans. 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Cereal Chem. 32:212~226.
10. Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lightfoot. 1969. Transport phenomena. John Wiley & Sons, Inc., New York.
11. Boyce, D. S. 1965. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. J. Agric. Engr. Res. 10(4): 333~341.
12. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids. 2nd ed., Oxford University Press, N. J.
13. Chittenden, D. H. and A. Hustrulid. 1966. Determining drying constants for shelled corn. Trans ASAE 9(1):52~55.
14. Crank, J. 1974. The mathematics of diffusion. Oxford University Press, New York. 2nd ed.
15. Flood, C. A., M. A. Sabbah and R. M. Peart. 1969. Simulation of natural air corn drying system. ASAE Paper No. 69~331. {A} Iso in Trans. ASAE 15(1):156)
16. Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin-layer drying equation. Trans. ASAE 17(6): 1167~1168, 1172.
17. Henderson, S. M. and S. Pabis. 1961. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. J. Agric. Engr. Res. 6(3):169~174.
18. Huizhen, L. and R. V. Morey. 1984. Thin-layer drying of yellow dent corn. Trans. of the ASAE 27 (1):195~200.
19. Hustrulid, A. and A. M. Flikke. 1959. Theoretical drying curve for shelled corn. Trans. ASAE 2(1) :112~114.
20. Misra, M. K. and D. B. Brooker. 1980. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. Trans. of the ASAE 23(5):1254~1260.
21. Nellist, M. E. 1976. Exposed-layer drying of ryegrass seeds. J. Agric. Engng Res. 21:49~66.
22. Newman, A. B. 1931. The drying of porous solid. Trans. AICHE 27:203.
23. Pabis, S. and S. M. Henderson. 1961. Grain drying

- theory. II. A critical analysis of the drying curve for shelled maize. J. Agric. Engr. Res. 6(4): 272~277.
24. Page, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. S. thesis, Purdue University.
25. Simmonds, W. H. C., G. T. Ward and E. McEwen. 1953. The drying of wheat grain. Part I: The mechanism of drying. Trans. Inst. Chem. Engrs., London 31(3):265.
26. Stipe, D. R., F. T. Wratten and M. F. Miller. 1973. Effects of various methods of handling brown rice on milling and other quality parameters. Louisiana Rice Experimental Station. Annual Report p. 113~153.
27. Syarief, A. M., R. V. Morey and R. J. Gustafson. 1984. Thin-layer drying rates of sunflower Seed. Trans. of the ASAE 27(1):195~200.
28. Thompson, T. L., R. M. Peart and G. H. Foster. 1968. Mathematical simulation of corn drying a new model. Trans. of the ASAE 11(4):582~586.
29. Van Rest, D. and G. W. Isaacs. 1966. Exposed-Layer Drying Rate of Small Grains. Trans. of the ASAE 9(5):688~689.
30. Wang, C. Y. and R. P. Singh. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper No.78-3001.
31. Wang, C. Y. 1978. Simulation of thin-layer and deep-bed drying of rough rice. Ph.D thesis. UCD.



학 위 취 득

성 명 : 송 대 빈 (宋大彬)

생 년 월 일 : 1960년 8월 12일

취 득 학 위 명 : 공 학 박사

학 위 수 여 대 학 : 서울대학교

학 위 취 득 년 월 일 : 1997년 2월 26일

학 위 논 문 : 벼의 橫流 連續式 乾燥 모델 開發과 퍼지論理를 利用한 乾燥 速度 制御에 관한 研究

